

Structural Behavior Study
for Asphalt Pavements

沥青路面 结构行为理论

孙立军等 著

217

同济大学出版社

沥青路面结构行为理论

孙立军等 著

同济大学出版社

内 容 提 要

高等级公路沥青路面在重交通荷载作用下出现了许多新的损坏现象,为了减少这类损坏,延长路面使用寿命,作者进行了长达十年的研究,本书是这些研究的汇总和集成。作者首先实测了路面在高速行车作用下的动水压力,发现了沥青在路面使用过程中的迁移现象;根据对实际工程的调查和试验,分析了路面损坏的机制,提出了新的分类方法;对重载作用下路面结构的应力场进行了分析,指出了剪应力的变化规律。在这些研究的基础上,分析了路面损坏的机制。根据多年积累的路面使用性能数据,建立了能够覆盖整个寿命周期的路面结构行为方程,阐述了方程的建立过程。以这些成果为基础,提出了基于性能的路面全寿命设计方法,并给出了部分设计诺谟图。最后,提出了需要进一步研究的问题。

本书可供从事公路、城市道路和机场工程的有关设计、施工、养护、管理和研究人员以及大专院校的教师和研究生等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面结构行为理论/孙立军等著. —上海:
同济大学出版社,2003.4
ISBN 7-5608-2579-6
I. 沥… II. 孙… III. 沥青路面—损坏—研究
IV. U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 006253 号

沥青路面结构行为理论

孙立军等著

责任编辑 兰孝仁 张平官 责任校对 郁 峰 封面设计 陈益平 冯 奇

出 版
发 行

同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销

全国各地新华书店

印 刷

崇明裕安印刷厂印刷

开 本

787mm×960mm 1/16

印 张

22.5

字 数

444000

印 数

1—1500

版 次

2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月第 1 次印刷

书 号

ISBN 7-5608-2579-6/U·38

定 价

34.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

沥青路面的研究和应用已有很久的历史,发达国家大量高速公路沥青路面的修建标志着人们在这一领域已经取得了辉煌的科技成就;同期出现的许多具有划时代意义的路面力学理论和设计方法,似乎表明了人们已经掌握了沥青路面的全部关键技术。但随着交通量和轴载的不断増加,路面上越来越频繁地出现了许多难以理喻的损坏现象,人们在用自信的目光反复搜寻施工工艺过程而久无成效后,变得迷茫起来,终于转向了一直令人倍感自豪的路面分析和设计理论领域,尽管这是不情愿和不自觉的。

为了回答沥青路面实践中遇到的新问题,美国公路工作者促使美国国会拨出了1.5亿美元的巨额资金,于1987年开始实施一个为期5年的大规模科学研究计划,即SHRP(Strategic Highway Research Program)计划。遗憾的是,SHRP计划未能很好地实现其预定的目标,这使人们对沥青路面的复杂性又有了进一步的认识,也使沥青路面的发展方向变得更加扑朔迷离。但这不仅没能阻止各国道路工作者继续探索沥青路面的步伐,反而激发了人们更大的研究热情,以至于1993年以来(SHRP之后)欧美各国又开展了持续的研究,而且研究规模越来越大,范围越来越广。虽然这些研究迄今尚未得出系统的、实用的成果,但人们已经越来越真切地达成了共识:“沥青路面远比人们所认识的要复杂得多”,探索新的理论和新的方法不仅是十分必要的,而且是十分迫切的。

本书是作者十年思考与探索的总结。1991年,本人开始走上了独立从事科学研究、独立指导研究生的艰难之路。此前几年的路面调查和评价使本人直观地认识到路面损坏的复杂性,直觉地认识到路面问题并不是力学理论所能完全解决的。从那时起便制定了研究目标,并带领研究生开始了沥青路面探索,闯入了这个充满着困惑、争议而又丰富多采的世界。十年来,尽管研究经费的拮据常使本人颇感无奈,资助来源的多样又使本人的研究领域多少有些飘忽不定,但始终没有忘却对沥青路面研究的喜爱、思考与探索,并随着研究的深入不断地修正我们的目标。应用领域的基础性研究资助者甚少;研究虽几度中断,庆幸的是没有停止。在这里,衷心感谢教育部长江学者奖励计划、国家自然科学基金委员会、上海市青年科技启明星计划、北京市公路局、上海市市政工程管理局和上海市浦东路桥公司,他们的及时资助(帮助)才使本人关于沥青路面的研究有了起码的条件,才使这项还需多年努力的事业有了一个好的开端。

十年的不懈研究已经初步形成了较为完整的框架——尽管微不足道,但可能包含着新的思考、新的体系和新的进展;在目前高速公路路面的非常规损坏越来越严重

并已引起从政府到学者广泛关注的今天,在国际沥青路面技术即将产生整体性突破的前夜,我们将初步的研究成果系统化,并理出章节、汇集成书、定名为“沥青路面结构行为理论”,目的是便于广大同行参考,也便于广泛倾听改进的意见和建议。

全书的写作大纲、书稿的修改、定稿以及第1章、第7章、第3章的§3.8节和第6章的§6.1节由孙立军负责完成。第2章和第3章的§3.1节至§3.5节由张宏超(1999级博士生)完成研究和撰写;§3.6节和§3.7节由胡小弟(2000级博士生)、陆辉(1998级博士生)完成研究,由胡小弟撰写。第4章由刘喜平(1990级硕士生)、许志军(1993级硕士生)、陈子建(1994级硕士生)和罗芳艳(1996级硕士生)完成研究,由刘黎萍(2000级博士生)进行补充整理并完成撰写。第5章和第6章由刘黎萍完成研究和撰写。感谢他(她)们所做的研究和对本人坚持从事这一领域基础性研究工作的支持。

孙立军

2002年12月

目 录

前 言

1 引 论	(1)
1.1 对路面设计的要求	(1)
1.2 路面设计方法	(1)
1.2.1 基于经验的设计方法	(1)
1.2.2 基于力学的设计方法	(5)
1.2.3 路面设计方法的基本评价	(18)
1.3 我国的路面研究	(22)
1.4 沥青路面的性能及其设计考虑	(24)
1.4.1 路面使用性能与路面结构行为	(24)
1.4.2 路面性能的研究	(25)
1.4.3 路面设计中关于性能的考虑	(30)
1.5 目前路面实践中的问题	(30)
2 沥青路面的损坏特征	(33)
2.1 沥青路面的常规损坏特征	(33)
2.1.1 裂缝	(33)
2.1.2 变形	(34)
2.1.3 表面损坏	(35)
2.2 沥青路面损坏的研究	(37)
2.2.1 早期损坏现象	(38)
2.2.2 早期损坏的评价方法及评价指标	(41)
2.3 沥青路面损坏的调查	(48)
2.4 初期损坏现象及其特征	(50)
2.4.1 典型损坏类型和特征	(50)
2.4.2 调查发现的其他一些问题	(59)
2.4.3 路面损坏的时间特征	(62)
3 路面初期损坏的机制	(65)
3.1 初期损坏的试验研究	(65)
3.2 级配分析	(75)
3.3 空隙率的影响	(79)
3.3.1 空隙率的测量	(79)

3.3.2	空隙率与路面初期损坏的关系	(83)
3.3.3	空隙率与透水性的关系	(84)
3.3.4	空隙率对沥青混合料耐久性的影响	(86)
3.3.5	空隙率与沥青混合料强度的关系	(88)
3.3.6	空隙率与沥青混合料水稳定性的关系	(96)
3.3.7	沥青/集料的粘附性	(100)
3.4	沥青面层的分层	(100)
3.5	动水压力的作用	(101)
3.5.1	行车产生的动水压力	(101)
3.5.2	动水压力的理论计算	(102)
3.5.3	动水压力的实测	(104)
3.6	路面的荷载特性	(106)
3.6.1	目前公路车辆的轴重特性	(106)
3.6.2	轮胎及胎压的变化特性	(108)
3.6.3	轮胎接地面积及接地压力分布的研究	(109)
3.6.4	轮胎接地压力非均匀性可能带来的后果	(113)
3.7	非均匀荷载作用下路面的应力应变场	(114)
3.7.1	分析的原理	(114)
3.7.2	应力应变的分析	(119)
3.7.3	分析的基本结论	(145)
3.8	路面初期损坏产生的机理	(147)
3.8.1	沥青在路面中的迁移	(147)
3.8.2	路面初期损坏的解释	(148)
3.8.3	路面初期损坏产生的机理	(149)
4	沥青路面的结构行为方程	(156)
4.1	路面性能指标及其计算	(156)
4.1.1	路面性能指标选择	(156)
4.1.2	路面状况指数 PCI	(157)
4.1.3	路面行驶质量指数 RQI	(164)
4.1.4	路面弯沉	(166)
4.2	数据调查与积累	(166)
4.2.1	路面数据的采集与积累	(166)
4.2.2	交通数据的调查与换算	(171)
4.3	使用性能衰变方程形式的选择	(176)
4.3.1	国际上代表性的路面性能方程形式	(177)
4.3.2	方程形式的选择	(187)

4.3.3	统一模型形式的意义	(191)
4.4	结构行为方程的建立	(192)
4.4.1	数据分析方法	(192)
4.4.2	数据整理	(193)
4.4.3	数据分类分级	(193)
4.4.4	PCI 的衰变方程	(195)
4.4.5	RQI 的衰变方程	(198)
4.4.6	路面弯沉的变化规律	(204)
4.5	环境因素的影响	(208)
4.5.1	环境的影响及环境参数	(209)
4.5.2	地区系数的确定	(214)
4.5.3	环境参数和地区系数的关系模型	(221)
4.5.4	全国主要城市的环境系数	(224)
4.6	综合方程及验证	(228)
4.7	不同因素对路面性能的影响分析	(230)
4.7.1	外部因素的影响	(230)
4.7.2	内部因素的影响	(232)
4.8	路面结构行为的图示	(236)
4.8.1	行为图示的含义	(236)
4.8.2	行为函数曲线的作法	(237)
4.8.3	不同路面结构的函数示例	(238)
4.8.4	行为函数曲线的应用——路面剩余寿命预估	(242)
5	复合式沥青路面的结构行为	(245)
5.1	复合式沥青路面结构行为的研究	(245)
5.1.1	研究的目的和意义	(245)
5.1.2	研究的现状	(246)
5.1.3	典型的考虑方法	(260)
5.2	数据采集与处理	(260)
5.2.1	数据采集	(260)
5.2.2	数据预处理	(261)
5.3	复合式沥青路面的结构行为方程	(262)
5.3.1	复合结构的耦合行为模型	(262)
5.3.2	复合结构的结构行为方程	(279)
5.4	有效厚度模型的应用	(279)
6	沥青路面的全寿命设计方法	(289)
6.1	设计考虑与流程	(289)

6.1.1	设计考虑	(289)
6.1.2	全寿命设计概念	(291)
6.1.3	全寿命设计方法流程	(293)
6.2	路面结构的概念设计	(295)
6.2.1	面层的功能和要求	(295)
6.2.2	排水层	(296)
6.2.3	基层	(296)
6.2.4	垫层和土基	(297)
6.2.5	交通	(297)
6.3	路面结构的详细设计	(297)
6.3.1	寿命周期费用分析	(297)
6.3.2	路面厚度的设计与优化	(308)
6.4	面层材料的设计原则	(334)
6.4.1	面层材料的设计	(334)
6.4.2	半刚性材料的设计	(337)
7	路面研究面临的几个问题	(338)
7.1	结构设计与材料设计的统一	(338)
7.2	荷载非均匀布效应的考虑	(341)
7.3	荷载换算的研究	(343)
7.4	环境影响分析和设计考虑	(343)
7.4.1	地下水的作用	(344)
7.4.2	高速行驶产生的动水压力的影响	(344)
7.4.3	温度的影响	(345)
7.4.4	路面在长期使用过程中材料的老化和材料性能的变化	(345)
7.4.5	荷载、环境的相互作用对路面性能的影响	(346)
7.5	路面材料研究的结构化趋势	(346)
7.5.1	材料设计的力学要求	(346)
7.5.2	结合料和集料在混合料中的作用	(346)
7.5.3	路面结构和环境对材料性能的要求	(347)
7.5.4	高性能的路面材料	(347)
7.6	沥青材料研究的数字化技术	(347)
7.7	动荷载的影响	(351)
7.8	设计理想的路面	(351)

1 引 论

1.1 对路面设计的要求

路面结构由路基(顶部)、垫层、基层和面层组成,是道路工程中最直接承受荷载和环境作用的部分。对路面的最基本要求是耐久、平整和抗滑。耐久是指路面具有足够长的使用寿命,这要求整个路面结构具有足够的强度和抗变形能力;事实上,迄今为止所有的设计方法都是围绕着耐久性这个核心而提出的。平整性要求是为了保证路面的行驶舒适性;对高等级公路/道路,由于行车速度快,保证平整度尤为必要。要做到路面长期平整,就必须有正确的厚度设计、正确的材料设计和正确的施工方法。抗滑是对路面表面特性的要求,表征了路面的行驶安全性,传统上不属于路面结构设计的内容,主要通过表层材料的选择和材料的设计予以保证。

路面的过早损坏意味着路面的耐久性不足。路面的损坏具有各种类型和各种形态。一般而言,高等级公路/道路的路面损坏包括变形(车辙)、开裂(疲劳开裂、低温开裂和反射裂缝)以及目前出现的一些新的损坏类型,过多的路面损坏意味着路面寿命的终结;限制、延迟这些损坏的发生和发展是路面设计的主要任务。

相对于整个道路/公路的寿命而言,路面的寿命是很短的;通常设计寿命只有 15 年。这样规定的主要目的是为了节省道路的初期造价,而将节省的费用用于路面的养护。随着交通量的增加,虽然路面结构的造价在整个工程中所占比例越来越小,但其绝对数值却越来越大,所起的作用也越来越大。另一方面,路面的维修对道路通行的影响变得越来越难以忍受,并容易引发恶性交通事故,所以越来越多的国家将沥青路面的设计寿命定为 20 年。

路面设计的主要任务就是确保其寿命期间不发生不可接受的损坏,这是不同设计方法的共同目标。要达到这一目标,就要考虑路面的“结构、材料、荷载、环境和经济”这五个方面的因素,而最终的判据则是路面的使用性能。所以,根据使用性能设计路面是一种合理的选择,这不仅是发展的趋势,也是发展的必然。

下面回顾一下几个有代表性的设计方法,看其如何满足路面的设计要求。

1.2 路面设计方法

1.2.1 基于经验的设计方法

1. CBR 设计法^[1,2]

CBR 是美国加州交通部于 1928~1929 年提出的表征道路材料抗力的指标,以材料的贯入抗力与标准碎石贯入抗力的百分比值表示。根据当时的调查,路面破坏的主要类型是:路面因吸水而导致路基材料的侧向位移;路面下的材料不均匀沉降;路面下材料的过大弯沉。根据这些调查结果,提出了 CBR 设计法,给出了适用于美国加州交通状况的设计曲线,以控制路基的剪切破坏。

第二次世界大战初,美国陆军工程师兵团对各种柔性路面设计方法进行了广泛的调研,并决定采用 CBR 方法。由于荷载差别很大,所以按照“等剪切”的原则,将设计标准外延到各类飞机荷载的范围。通过多年研究和经验的积累,1956 年提出了路面厚度与轮载、轮胎压力的关系式,之后又根据荷载的重复作用和重载的作用,对该路面厚度公式进行了多次修正。

1972 年,美国全国碎石协会根据美国工程师兵团的 CBR 法制定了适用于公路的路面 CBR 设计方法。该方法的设计思想是,路面应提供足够的厚度和质量,以防止任一路面层内产生重复剪切变形;冰冻是一个重要影响因素,应设法减小到可以接受的程度。

CBR 设计法是一种经验性的方法,设计过程简单,概念明确,适用于重载、低等级的路面设计;所提出的 CBR 指标已被作为路面材料的一种参数指标得到了广泛应用。

2. AASHTO 方法^[3,4]

AASHO(现为 AASHTO)设计方法产生于 1958~1962 年间的 AASHO 道路试验,是一个产生了重大影响的设计方法。试验工作于 1961 年底完成,1962 年 5 月做出总结,并发表了 7 本研究报告,提供了大量关于路面设计、施工的宝贵资料。

AASHTO 法提出了路面现时服务能力指数 PSI 的概念,以反应路面的服务质量。通过对相同路段的主观评价与客观评价,建立了 PSI 与路面状况的关系,如式(1-1)所示。主观评价指组成评分小组,由评分小组成员对路面分别进行评分(0~5),所得到的评分值即表示 PSI 值;客观评价指量测路面的坡度变化、车辙深度、裂缝面积等状况。

$$PSI = 5.03 - 1.91 \lg(1 + \overline{SV}) - 1.38 \overline{RD}^2 - 0.01 \sqrt{C + P} \quad (1-1)$$

式中 PSI ——路面现时服务能力指数(Present Serviceability Index),是一个无量纲量,反映了道路使用者对路面服务质量的平均评价,其数值在 1~5 之间;

$\overline{SV}$ ——平均坡度变化;

$\overline{RD}$ ——车辙深度平均值(cm);

C ——已发展成网状的裂缝面积;

P ——修补的面积。

该设计方法最初的基本设计方程是：

$$\lg W_{18} = 9.36 \lg(SN+1) - 0.2 + \frac{\lg \frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} \quad (1-2)$$

式中 W_{18} ——累计标准单轴荷载(ESAL)作用次数；

ΔPSI —— PSI 从路面新建至使用年限末的差值 ($4.2 - P_1$)，依道路等级确定；

SN ——路面结构数，表征路面结构的等效厚度；

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (1-3)$$

式中 a_i ——第 i 层的材料系数；

D_i ——第 i 层的厚度。

路面结构数是 AASHO 方法中特别定义的，用以反映路面各层(除路基外)的等效厚度。式(1-3)中的 a_i 与材料的类型和强度有关，可根据该材料的弹性模量、马歇尔稳定度、CBR 值、三轴试验结果或无侧限压缩试验结果换算而得。根据预测的设计年限内的累计等效单轴荷载作用次数，利用式(1-2)可以计算出需要的最小路面结构数 SN ，再根据所采用的路面各结构层材料，利用式(1-3)可以确定路面各层的厚度。

式(1-2)中的 ΔPSI 是路面初始 PSI 与使用年限末 PSI 的差值。在 AASHO 设计方法中，假定新路面的 $PSI=4.2$ ，使用期末的 $PSI=1.5$ 。

AASHO 的设计方程表明，不同的路面结构，不管其结构组合如何，只要其结构数相同，则其使用寿命和使用性能是相同的。

1986 年，AASHTO 出版了新的路面设计指南，设计中引入了结构可靠度和路面排水条件的影响，设计方程如式(1-4)所示。

$$\begin{aligned} \lg W_{18} = & Z_R S_0 + 9.36 \lg(SN+1) - 0.2 + \frac{\lg \frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} \\ & + 2.32 \lg M_R - 8.07 \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 Z_R ——路面的可靠度系数；

S_0 ——该方程的综合标准差， S_0 的大小与路面的变异性有关，在通常情况下，沥青路面的 S_0 值可取 0.4~0.5；

M_R ——基础回弹模量(psi) (1psi=6894.76Pa)，受冰冻等气候因素的影响很大，在设计时应予仔细考虑。

在结构数 SN 的计算中，则考虑了结构层的排水条件：

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (1-5)$$

式中, m_i 为路面结构第 i 层的排水系数, 其数值和范围随季节变化而变化。如果路面不透水, 且具有良好的路边排水设施, 这将使路面内的水位保持在垫层以下, 此时的 m_i 值在 1.0~1.4 之间。而当水位的变化使粒料垫层处于饱和状态时, 其相应的排水系数只有 0.4 左右。

与 AASHO 初始的设计方程相比, 上面的这种改进无疑是合理的。一方面, AASHO 的原设计方程仅考虑了路面性能的平均变化趋势, 当按该方程设计时, 仅有 50% 的保证率, 此处增加了可靠度系数, 可以提高设计方程的可靠性; 同时, 方程中考虑了结构的变异性, 对不同的道路可以采用不同的保证率系数。另一方面, 考虑环境(排水)因素的影响, 使设计结果的针对性和可靠性更高。

经过多年的研究和补充, 1993 年出版的 AASHTO 指南进行了多方面的改进, 包括改进了可靠度的考虑、推荐采用 T274 作为确定土的承载值的标准试验方法、推荐采用回弹模量值确定结构层系数、进一步考虑排水和冻融等环境因素的影响、给出了路面临界使用性能值高达 $PSI=3.0$ 时的荷载等效值以及低流量道路设计等等。实际上, 1993 版的 AASHTO 的主要工作是增补了旧路面重建的设计方法, 而对新路面, 其核心设计方程并无实质性变化。

AASHO 设计法第一次提出了路面现时服务能力指数 PSI 的概念, 提出了轴载换算的概念和公式, 考虑了路面的可靠度。它以使用年限末的路面服务能力指数 P_t 作为设计控制标准, 使路面结构设计和路面使用期末的性能联系起来。这些思想对后来世界各国的设计思想产生了很大的影响。但该设计方法是依据短期试验结果得出的, 试验时选用的路面材料十分有限, 路基土类型少, 环境因素单一。研究结果由试验时两年的加速试验外延至 10~20 年, 未考虑环境和荷载综合作用导致的 PSI 损失。试验时选用的试验车队车型及轴型固定, 和实际情况中的混合交通情况不一致。由于仅以 SN 表示路面结构, 确定厚度时在考虑施工时的最小压实度和最小经济厚度的同时, 还需要大量的经验, 导致了结构设计结果不唯一, 各层次之间存在可替换关系, 难以真正保证路面的使用寿命。

鉴于该设计方法的诸多不足, AASHTO 正在研究制定新的设计指南 AASHTO 2000 和 AASHTO 2002。2000/2002 修订版至今尚未完成, 修订的主要指导思想是^[5]:

- ① 采用力学-经验法, 设计中引入各种力学-经验模型;
- ② 主要设计参数采用多级输入;
- ③ 提供一套完整的设计软件。

AASHTO 2002 的设计流程如图 1-1 所示。

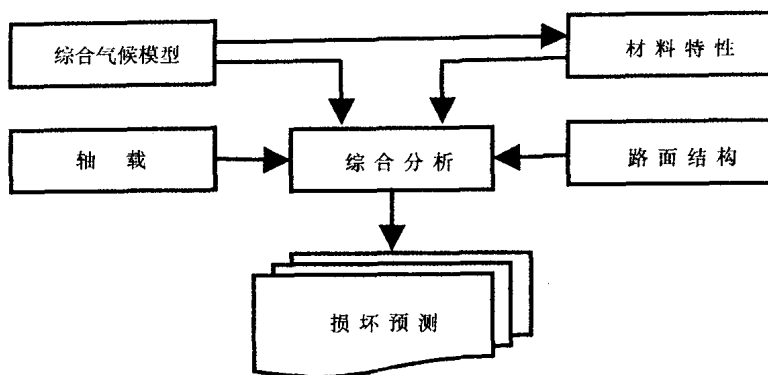


图 1-1 AASHTO 2002 设计流程

1.2.2 基于力学的设计方法

1. 概况

20 世纪 60 年代以来,随着路面力学的进步和计算手段的飞速发展,加上对路面研究的投入日益减少,使采用力学方法进行路面分析和设计的想法渐成潮流,并逐步占据主导地位。在这种思想的指导下,人们研制了多种路面分析软件(多层弹性体理论解),常用的软件如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的多层弹性体分析软件^[6,7]

软件 \ 指标	能分析的最大层数	能分析的最大荷载数	层间接触条件	可靠度考虑	开发者
BISAR	10	10	从完全连续到完全滑动	无	Shell 公司
	说明:① 由于为每一点提供完整的应力应变信息,所以运行时间较长 ② 可考虑水平向荷载和竖向荷载				
CHEV	5	2	完全连续	无	契夫隆公司
	说明:在使用 CHEV 软件的 AI 的 DAMA 系统中考虑了非线性反映				
ELSYM	10	100	从完全连续到完全滑动	无	Berkeley 加州大学
	说明:对特定的点,运行速度很快				

续表

软件 \ 指标	能分析的 最大层数	能分析的 最大荷载数	层间接触 条件	可靠度考虑	开发者
PDMAP (PSAD)	5	2	完全连续	是	NCHRP
	说明:① 当可靠度不是 50%(确定型模式)时运行时间很长 ② 采用试算法确定未处治粒料的模量				
VESYS	5	2	完全连续	是	FHWA
	说明:① 当采用可靠度模式时运行时间很长 ② 考虑了材料的弹性和粘弹性				
CHEVIT	5	2	完全连续	是	陆军工程兵 水道试验站
	说明:① CHEV 程序的改进型 ② 包括粒料层应力敏感性内容				
CIRCLY	5+	10+	从完全连续 到完全滑动	无	ARRB
	说明:① 可考虑竖向和水平荷载,特殊情况下可考虑径向荷载 ② 可以考虑应变能 ③ 能考虑各向异性材料				
EV	20+	不限	从完全连续到 完全滑动	无	同济大学
	说明:可以考虑水平荷载				
NAAPS	不限	不限	从完全连续到 完全滑动	无	同济大学
	说明:可以考虑材料的各类非线性,如粘性、塑性、粘弹性、粘塑性和弹塑性等				
APAS-WIN	多层弹性体系,能分析气候、轴载谱、轮胎特性温度和疲劳的影响				
AXYDIN	轴对称有限元,可以分析动荷载				
CAPA-3D	三维有限元,可以分析非线性、流变、各向异性、层间接触条件、动荷载、轮胎特性、裂缝传播、温度、累计损伤、疲劳和永久变形				
KENLAYER	多层弹性体系,可以分析非线性、流变性、层间接触条件、动荷载、轮胎特性、累计损伤、疲劳和永久变形				

续表

软件 \ 指标	能分析的 最大层数	能分析的 最大荷载数	层间接触 条件	可靠度考虑	开发者
MICHPAVE	轴对称有限元, 可以考虑非线性特性, 能考虑疲劳				
MMOPP	多层弹性体系, 可以进行非线性、气候作用、动荷载、轴载谱、轮胎特性、可靠度、裂缝传播、累计损伤、疲劳和永久变形等分析				
NOAH	多层弹性体系, 可以进行各向异性、层间接触条件、气候作用、轴载谱、可靠度、疲劳和永久变形等分析				
SYSTUS	三维有限元, 可以进行非线性、流变性、各向异性、层间接触条件、动荷载、轮胎特性和裂缝传播等分析				
VGADIM95	多层弹性体系, 可以进行气候作用、温度作用、累计损伤、疲劳和永久变形等分析				
VEROAD	多层弹性体系, 可以进行气候作用、轴载谱、轮胎特性、可靠度、累计损伤、疲劳和永久变形等分析				

20 世纪 60 年代末期以后, 一些研究者采用有限元方法进行路面分析。与多层弹性体理论相比, 有限元方法在考虑材料的性能方面更为灵活。而在动荷载的考虑方面虽然有所研究, 但没有得到广泛应用。

在上述分析系统的基础上, 建立了许多基于分析的路面设计方法, 表 1-2 是常见的基于分析的路面设计方法的例子。

表 1-2

几种常见的基于分析的路面设计方法^[6]

机构 \ 指标	路面模型	损坏模式	环境考虑	路面材料	设计方式
Shell	弹性多层体	处治材料的疲劳, 路基和沥青层的车辙	温度	沥青混凝土, 粒料, 水泥稳定粒料	设计诺谟图; BISAR 软件
AI	弹性多层体	沥青处治层的疲劳, 路基应变(车辙)	温度, 冻融	沥青混凝土, 乳化沥青处治基层, 粒料	设计诺谟图; DAMA 软件
南非 NITRR	弹性多层体	处治层的疲劳, 路基应变和粒料层剪应变(车辙)	温度	断级配混合料, 沥青混凝土, 水泥稳定碎石, 粒料	典型设计分类; 软件

续表

指标 机构	路面模型	损坏模式	环境考虑	路面材料	设计方式
FHWA	弹性或粘弹性多层体	处治层的疲劳, 估计的车辙, <i>PSI</i>	温度	沥青混凝土, 水泥稳定粒料, 粒料, 硫磺处治材料	VESYS 软件
诺丁汉大学	弹性多层体	处治层的疲劳, 路基应变(车辙)	温度	断级配混合料, 沥青混凝土, 粒料	设计诺谟图; 软件
LCPC	弹性多层体	处治层的疲劳, 车辙	温度	沥青混凝土, 沥青处治基层, 水泥稳定碎石, 粒料	典型设计分类; 软件
比利时	弹性多层体	处治层的疲劳, 车辙	温度	沥青混凝土, 沥青稳定基层, 粒料	设计诺谟图; 软件
NCHRP(1-10B)	弹性多层体	处治层的疲劳, 车辙	温度	沥青混凝土, 沥青稳定基层, 粒料	设计诺谟图; 软件
NCHRP(1-26)	弹性多层体有限元	处治层的疲劳, 路基应变(车辙)	温度	沥青混凝土, 粒料	ILLI-PAVE; 软件, 如 EL-SYM

在大体同期产生的基于力学分析的设计方法中, Shell 设计法和 AI 设计法是较为完善的, 是路面设计理论法的典型代表。

2. Shell 设计法

Shell 设计方法是由英、荷壳牌石油公司研究所研究、发展和完善起来的基于力学分析的设计方法, 1963 年发表了设计计算图解法, 1978 年提出了较为完善的壳牌路面设计手册 (SPDM), 现已发展为基于计算机的 Shell 法^[8,9]。

Shell 法把路面当作一种多层线弹性体, 各层材料以动态模量/劲度表征, 以厚度 h_i 、模量 E_i 和泊松比 μ_i 表示路面特征。混合料的粘弹性性质以其劲度模量体现, 其值取决于沥青含量、沥青劲度和沥青混合料的空隙率。路基模量受应力影响, 路基动